Lane Medical Libra

Beitrag

ZUR

Lehre von den Gesichtsempfindungen.

INAUGURALDISSERTATION

WELCHE

ZUR ERLANGUNG DER DOCTORWÜRDE

IN DER

MEDIZIN, CHIRURGIE UND GEBURTSHILFE

MIT ZUSTIMMUNG

DER MEDIZINISCHEN FAKULTÄT

DER

FRIEDRICH-WILHELMS-UNIVERSITÄT ZU BERLIN

AM 2. DEZEMBER 1902

NEBST DEN ANGEFÜGTEN THESEN

ÖFFENTLICH VERTHEIDIGEN WIRD

DER VERFASSER

Sigmar Karplus

approb. Arzt aus Berlin.

OPPONENTEN:

HERR DR. MED. BESSER, approb. Arzt.

„ CAND. RER. TECHN. RUBIN

„ ROSENTHAL, approb. Arzt.

BERLIN 1902.

Druck von Gustav Winkler, Gr. Frankfurterstr. 34.

Meinen lieben Eltern.

§ 1. Einleitung.

Zur Bestimmung der relativen Helligkeitswerte der verschiedenen Farben eines Spektrums wurde in neuerer Zeit mehrfach eine Methode angewandt, die die verschiedenen Farben unmittelbar auf ihre Helligkeit hin mit einander vergleicht.

Bei dieser Methode entwirft man von zwei einander gleichen Lichtquellen zwei Spektren und die Lichter von verschiedenen Wellenlängen des einen Spektrums I werden mit Licht einer bestimmten Wellenlänge des andern Spektrums II verglichen, dessen Lichtquelle durch den ganzen Versuch hindurch gleiche Intensität behalten muss. Dieses Licht von konstanter Helligkeit und Wellenlänge dient also als Vergleichslicht und die verschiedenen Farben des Spektrums I werden nacheinander mit diesem verglichen. Bei jeder einzelnen Farbe des Spektrums I wird die Intensität der dieses Spektrum I erzeugenden Lichtquelle so lange geändert, bis diese Farbe die gleiche Helligkeitsempfindung auslöst, wie das Vergleichslicht. Die dabei für die verschiedenen Farben des Spektrums I verschiedenen gefundenen Werte der Intensitäten ihrer Lichtquelle, können dann in ein bestimmtes Verhältnis zu dem Wert der konstant gehaltenen Intensität des Vergleichslichtes gesetzt werden und diese Verhältnisse können dann in einer unten ausführlich geschilderten Weise als Mass für die verschiedenen Helligkeitswerte der Spektralfarben dienen.

Welches Vergleichslicht man wählt, d. h. welche Wellenlänge und welche Intensität dieses Vergleichslichtes ist gleichgiltig. Nur müssen diese beiden Faktoren innerhalb eines und desselben Versuches konstant gehalten werden.

Diese Methode, die von v. Brücke sehr prägnante Methode der heterochromen Photometrie genannt wurde, zeichnet sich durch grosse Einfachheit aus.

Trotzdem konnte sie doch von vielen trichromatischen Forschern nicht angewandt werden, da es ihnen unmöglich schien, hinreichend sicher beurteilen zu können, ob zwei ganz verschieden gefärbte Flächen, wie z. B. eine rote und eine grüne oder blaue gleich hell seien oder nicht.

So schreibt v. Helmholtz:* „Ich selbst muss gestehen, dass ich über eine grosse Unsicherheit in diesen Vergleichungen nie hinausgekommen bin, obgleich ich in der Vergleichung sehr kleiner Farbenunterschiede bei gleicher Helligkeit und sehr kleiner Helligkeitsunterschiede bei gleicher Farbe andern Beobachtern nicht nachzustehen glaube.“ und kurz vorher: „Beobachter, die sich in dergleichen Beobachtung viel geübt haben, kommen schliesslich zu etwas grösserer Sicherheit, die allerdings auch

*) H. v. Helmholtz, Physiolog. Optik. Auflage II S. 429.

durch eine Art von fester Gewohnheit oder grösserer Aufmerksamkeit auf verschiedene unterstützende Nebenwirkungen gewonnen werden können. Auffallend ist die grössere Sicherheit, welche hierbei dichromatische Beobachter zeigen, bei denen ja übrigens auch die Aufgabe eine viel einfachere ist. Wenigstens hat sich Herr E. Brodhun in dieser Beziehung seinen Mitbeobachtern durchaus überlegen gezeigt selbst in der Vergleichung solcher Farben, die auch seinem grünblinden Auge ungleich erscheinen."

Durch eine Arbeit A. Königs*) ist die Richtigkeit dieser Anschauung, dass Farbentüchtige nur mit grösster Unsicherheit Helligkeitsvergleichungen verschiedener Farben vornehmen können und den Dichromaten darin sehr nachstehen, in Zweifel gezogen worden, und es ist wahrscheinlich dass auch Trichromaten bei hinreichender Uebung mit genügender Sicherheit derartige Helligkeitsschätzungen machen können.

Ganz frei jedoch von der erwähnten Schwierigkeit ist eine Methode die nicht direkt die Helligkeit der verschiedenen Spektralfarben schätzt sondern als Mass dafür die Unterschiedsschwelle der verschiedenen Spektralbezirke für die Zumischung von weissem Licht nimmt.

Je grösser also die Menge weissen Lichtes ist, die zu einer Spektralfarbe gemischt werden muss, um eine ebenmerkliche Sättigungsabnahme derselben hervorzurufen, desto heller ist sie.

Ich will nun auf diese von K. v. Vierordt**) angegebenen Methode näher eingehen.

§ 2. Vierordt'sche Methode.***)

In die Mitte des Sprektrums einer bestimmten Petroleumlampe warf Vierordt einen kleinen $^1/_{17}$ der Spektrumlänge betragenden, schmalen horizontalen, weissen Lichtstreifen, der von einem schmalen, horizontalen Spalt stammte, der durch eine der ersten Petroleumlampe gleiche Lichtquelle, Vierordts sogenannter „Normalflamme", erleuchtet war. Dieser horizontale Spalt war beweglich, so dass der weisse Lichtstreifen über das ganze Spektrum hin verschoben werden konnte. Durch Rauchgläser zwischen Spalt und Normalflamme und Verkleinerung des Spaltes selbst konnte die Intensität des weissen Lichtstreifens beliebig verringert werden. Je heller der Spektralbezirk war, auf dessen Mitte der kleine, schmale weisse Streifen geworfen wurde, desto dünner musste das die Normalflamme abschwächende Rauchglas sein, und desto breiter musste der vor der Normalflamme befindliche Spalt gemacht werden, um einen eben

*) A. König, Über den Helligkeitswert der Spektralfarben bei verschiedener absoluter Intensität. Beiträge zur Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane. Hrsgb. von A. König 1891.

**) K. v. Vierordt., Poggend. Annal. Bd. 137. 1869 und «die Anwendung des Spektralapparates zur Messung und Vergleichung des farbigen Lichtes«. Tübingen 1871.

***) Die Schilderung und angeführten Citate beziehen sich auf die zweite, angeführte Arbeit v. Vierordts.

merklichen Sättigungsunterschied hervorzurufen zwischen der Mitte dieses Spektralbezirkes und seinen Partien oberhalb und unterhalb des zugemischten weissen Streifens. Umgekehrt musste die Spaltbreite verringert, das Rauchglas stärker gewählt werden, je dunkler der Spektralbezirk war, in dem ein eben merklicher Sättigungsunterschied erwähnter Art hervorgerufen werden sollte. Es konnten daher die in den verschiedenen Spektralbezirken zur Hervorbringung dieses ebenmerklichen Sättigungsunterschiedes notwendigen Lichtintensitäten der Normalflamme als ein direktes Mass der Helligkeitswerte der betreffenden Spektralbezirke gesetzt werden.

Da Vierordt die Lichtstärke seiner Normalflamme, die Absorbtionskraft seiner Rauchgläser und den Grad der Schwächung der Lichtintensität seiner Normalflamme durch den Spalt bei jeder Weite desselben numerisch kannte, so waren — nach Abzug der durch die Rauchgläser und mehr oder weniger engen Spalte am Durchgehen durch den Spalt gehinderten Lichtmengen — die noch übrigbleibenden Lichtintensitäten der Normalflamme, die in den verschiedenen Spektralbezirken einen eben merklichen Sättigungsunterschied hervorrufen konnten, ein Mass für die Helligkeitswerte dieser Spektralbezirke. Allerdings wählte nun Vierordt als Mass der spektralen Helligkeit nicht diejenige Weissmenge, welche einen ebenmerklichen Sättigungsunterschied hervorrief, sondern diejenige die eben keinen merklichen Sättigungsunterschied mehr hervorbringen konnte, was im Prinzip allerdings das Gleiche ist.

„Man hat also die Aufgabe für jede Stelle des Spektrums die noch übrig bleibende Stärke des Normallichtes zu bestimmen, bei welcher das Bild der beweglichen Spalte eben verschwindet," und es verhält sich demnach die Lichtstärke der verschiedenen Stellen eines und desselben Spektrums „(Gleichheit der Breite der Eintrittsspalte vorausgesetzt) proportional der durch Rauchgläser abgeschwächten Lichtstärke der beweglichen Spalte, bei welcher das schwache Weiss der letzteren eben anfängt ununterscheidbar zu werden, wo also mit andern Worten die auf das Spektrum projicierten Konturen der Spalte eben verschwinden."

Weiter unten schreibt Vierordt:*) „Meine Methode misst nicht etwa die Lichtempfindungen selbst. Gegenstand der Messung ist diejenige Intensität des Normallichtes, bei welcher letzteres vermischt mit dem zu messenden farbigen Licht eben verschwindet. Man hat also durch stufenweise Abschwächung des Normallichtes, oder durch allmälige Verstärkung der Intensität der zu messenden Farbe, oder durch beide Hilfsmittel zugleich ein solches Verhältnis der Lichtstärken des Normallichtes N und des farbigen Lichtes L herzustellen, dass der von N und L zugleich erleuchtete Teil eines und desselben Spektralbezirkes nicht mehr unterschieden werden konnte von dem andern durch L. allein erleuchteten Teil."

*) S. 34. Der erwähnten Abhandlung.

Zur Bestimmung der relativen Werte von L, um deren Messung es sich schliesslich handelt, ist die Kenntnis der wirklichen Verhältnisse von $\frac{N}{L}$ nicht unumgänglich erforderlich. Ich selbst kann vorerst hierüber keine Auskunft geben, so sehr ich mich bemühte, ein Verfahren ausfindig zu machen, um am Spektralapparat selbst diesen Wert bestimmen zu können. Bekanntlich ist N sehr klein gegenüber von L.

Wenn das Verhältnis $\frac{N}{L}$ gleich bleibt bei verschiedenen absoluten Lichtstärken, so sind die relativen Intensitäten von N auch zugleich die Masse der relativen Intensitäten der einzelnen Farben. Die Konstanz von $\frac{N}{L}$ innerhalb einer hingänglichen Breite der absoluten Lichtstärke geht aus meinen zahlreichen Erfahrungen auf das deutlichste hervor."

Es war jedoch nötig zu prüfen, wie weit die Methode imstande ist brauchbare Resultate zu liefern, da ja, wie von vornherein einleuchtet, die Deutlichkeitsgrade der Ebenmerklichkeit oder Ebenunmerklichkeit des weissen Streifens in der Mitte einer und derselben Spektralstelle sehr verschieden sein können, und daher die Lichtintensitäten der Normalflamme, bei denen das Weiss in seinem Urteil eben unmerklich war, nicht ohne weiteres als Mass der Helligkeitswerte der betreffenden Spektralstellen gesetzt werden konnten. Vierordt musste daher die verschiedenen Grade der Ebenmerklichkeit resp. Ebenunmerklichkeit, „welche das Weiss im Bereiche der Spektralfarbe hat, von welchem die Genauigkeit der Methode wesentlich abhangt, näher prüfen".

Zu diesem Zweck liess er durch einen Gehilfen für ein und dieselbe Spektralstelle den beweglichen Spalt vor der sonst in ihrer Intensität konstant gehaltenen Normalflamme beliebig ändern, ohne selbst zu wissen, ob er bei einer Veränderung erweitert oder verengert wurde. Nach jeder Aenderung der Spaltbreite gab er sein Urteil ab, ob er das zugemischte Weiss in dieser Spektralstelle wahrnehme — Positives Urteil — oder nicht — negatives Urteil —. Bei jeder der von ihm so untersuchten Spektralstellen fand er dann, dass er von einem gewissen Maximum der Spaltbreite an, das natürlich für die verschiedenen Spektralstellen verschieden war, stets positive Urteile, von einem gewissen Minimum der Spaltbreite an, das wiederum für die verschiedenen Spektralbezirke verschieden war, stets negative Urteile abgegeben hatte.

In jedem der von ihm so untersuchten Spektralbezirke gab er dann bei denjenigen Spaltbreiten, welche kleiner als die kleinste, bei der sämtliche Urteile positiv waren, jedoch grösser waren als die grösste, bei der noch sämtliche Urteile negativ waren, bald positive, bald negative Urteile ab und zwar so, dass bei den grösseren Spaltbreiten die Urteile vorwiegend positiv, bei den kleineren Spaltbreiten vorwiegend negativ ausfielen. In der Mitte zwischen den Beiden extremen Spaltbreiten, wo die Urteile entweder sämtlich positiv oder sämtlich negativ waren, gab es in jeder Spektralstelle eine mittlere Spaltbreite, bei der er ebensoviel positive als negative Urteile abgegeben hatte.

Diese durch die mittlere Spaltbreite hindurchgegangene Lichtmenge der Normalflamme ist das genauste Mass für die Lichtintensität, bei welcher das Bild der beweglichen Spalte in einer Spektralstelle eben verschwindet, und welche als Mass der Helligkeit dieser Spektralstelle ohne weiteres dienen kann.

Bei Einstellung auf Ebenunmerklichkeit des Weiss in einer Spektralstelle hätte also diese mittlere Spaltbreite eingestellt werden müssen, damit die Methode exakte Resultate lieferte. Da diese mittlere Spaltbreite jedoch nicht wesentlich grösser war, als die grösste, bei der bereits sämtliche Urteile negativ waren und die daher eigentlich schon einen zu hohen Grad der Unmerklichkeit lieferte, war die Methode selbst dann brauchbar, wenn bei Einstellung auf Ebenunmerklichkeit des Weiss die Spaltbreite so extrem klein gemacht worden wäre. Vierordt schreibt daher; „Das Auge des nur einigermassen geübten Beobachters begeht daher bei der Einstellung auf (Ebenmerklichkeit oder) Ebenunmerklichkeit Fehler, die sicher viel kleiner sind, als diejenigen, welche die wechselnde Intensität seines Normallichtes in die photometrischen Bestimmungen einführt."

Die Methode der Einstellung auf Ebenunmerklichkeit des Weiss in den verschiedenen Spektralbezirken, ist also für die Helligkeitsmessung dieser Spektralbezirke hinreichend exakt.

Das Maximum der Helligkeit im Spektrum seiner Petroleumlampe fand Vierordt auf diese Weise in der Gegend der D-Linie. Seine Kurve*) der Helligkeitswerte der Spektralfarben — die Helligkeitswerte sind als Ordinaten über den Spektrum als Abscisse aufgetragen — stimmten im wesentlichen mit der Fraunhofer's**) überein, der die Kurve fand durch Helligkeitsvergleich der verschiedenen Spektralbezirke mit einer gleichmässig erleuchteten, weissen Fläche.

Die später unter dem Purkinjeschen Phänomen beschriebenen Aenderungen des Helligkeitsverhältnisses der verschiedenen Spektralfarben zu einander bei starker Intensitätsänderung der sie erzeugenden Lichtquelle, trat bei v. Vierordts Untersuchungen ebenfalls in die Erscheinung.***)

Setzte er die Intensität seiner Petroleumlampe soweit herab, bis die einzelnen Spektralregionen ihren Farbenton verloren, so sah er, dass Licht von grösserer Wellenlänge, um noch eben wahrgenommen werden zu können, eine geringere Abschwächung erträgt, als ungefähr gleichstarkes Licht von kleinerer Wellenlänge. Ebenso zeigte sich im Spektrum des diffusen Tageslichtes des trüben Himmels „die Helligkeit verhältnissmässig am stärksten gemindert in den Bezirken B—C und A—B, weniger in C—D und E—G, während die relative in G—H^1 im Vergleich zum Sonnenspektrum sogar zugenommen hat."

---

*) Poggend. Annal. Bd. 137. 1869.
**) J. Fraunhofer, Denkschriften d. bayr. Akadem. Bd. V.
***) In seiner zweiten Arbeit.

Das Wandern des Helligkeitsmaximums im Spektrum konnte bei seinen Untersuchungen nicht in die Erscheinung treten, da das Spektrum des diffusen Tageslichtes noch zu lichtstark war.

§ 3. Präzisierung der Aufgabe.

Da Vierordt seine Untersuchungen nicht auf tiefste Dunkeladaptation des Auges ausdehnte, so habe ich auf Anregung des jüngst verstorbenen Professors A. König die Verwendbarkeit der Vierordt'schen Methode für Helligkeitsmessungen der Spektralfarben nach dieser Richtung ergänzend geprüft.

Da ich „rotblind", im v. Kries'schen Sinne Protanop bin, prüfte ich die nach dieser Methode für tiefe Dunkeladaptation gewonnenen Resultate auf ihre Richtigkeit resp. Brauchbarkeit, dadurch, dass ich Paralleluntersuchungen nach der Methode der heterochromen Photometrie, die allerdings bei tiefster Dunkeladaptation des Auges richtiger isochrome Photometrie genannt werden muss, anstellte.

Ausserdem machte ich noch Parallelversuche nach beiden Methoden für Helladaptation des Auges, da gerade hier der hohe Wert der Methode der heterochromen Photometrie für den Dichromaten ausser Zweifel steht, und ein guter Vergleich der Brauchbarkeit der Vierordt'schen Methode für hell und tief dunkeladaptiertes Auge möglich war.

Bei Brauchbarkeit der Vierordt'schen Methode mussten dann die nach beiden Methoden gefundenen Helligkeitswerte der verschiedenen Spektralfarben für helladaptiertes Auge einerseits und für dunkeladaptiertes Auge andrerseits annähernd übereinstimmen.

Der Gang der Untersuchung war folgender:

Bestimmung der relativen Helligkeitswerte der Spektralfarben für

A. Helladaptation des Auges

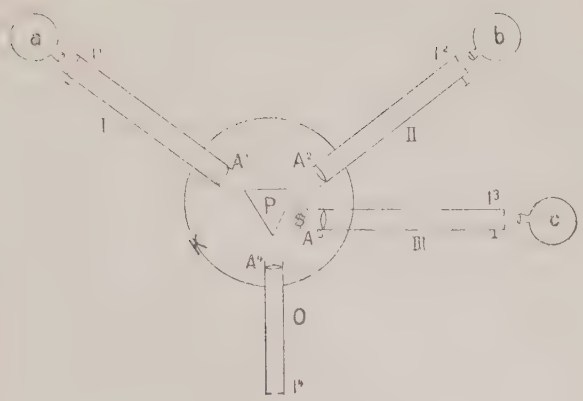
1. nach der Methode der heterochromen Photometrie,
2. nach der Vierordtschen Methode.

B. tiefe Dunkeladaptation des Auges.

1. nach der Methode der heterochromen Photometrie,
2. nach der Vierordtschen Methode.

§ 4. Der Apparat.

Der Spektralapparat, der bei den Versuchen zur Anwendung kam, war dem ähnlich, den A. König in der bereits erwähnten Arbeit benutzt und beschrieben hat. Nebenstehende Skizze veranschaulicht ihn.



P ist ein gleichseitiges Flintglasprisma.

I, II, III sind Kollimatorröhren, deren bilaterale, vertikale Spalte l_1, l_2, l_3 in der Brennebene biconvexer Linsen A_1, A_2, A_3 stehen.

Die Spalte können in ihrer Breite durch Mikrometerschrauben variert werden; und ihre Breite selbst durch eine an den Schraubenköpfen befindliche Gradeinteilung abgelesen werden. Ihr Nullpunkt wurde mittelst Episkotister genauer bestimmt, da bei dem Nullpunkt der Gradeinteilung die Spalte sämmtlicher Kollimatorröhren noch Licht durchliessen.

O ist das Okularrohr, dessen vertikaler schmaler Spalt l_4 ebenfalls in der Brennebene der biconvexen Okularrohrlinse A_4 steht.

Erleuchtet sind die Spalte durch die Auerbrenner a, b, c, deren matte Glascylinder von geschwärzten Blechcylindern umgeben sind. Letztere zeigen in der Höhe der Kollimatorspalten einen Metallansatz mit daran befindlicher, planconvexer Linse. Ein horizontaler Schnitt durch die Mitte dieses Ansatzes veranschaulicht in der Figur die Lichtquellen.

Blickt man durch den Okularspalt bei beleuchtetem Spalt l_1 und l_2 so sieht man zwei verschieden oder gleichgefärbte Halbkreise von verschiedener oder gleicher Helligkeit, die in einer vertikalen Graden, der vorderen Prismenkante, zusammenstossen, und von denen der rechte Halbkreis vom Spalt l_1 des linken Kollimatorrohrs und der linke vom Spalt l_2 sein Licht bezieht.

Die Farbe dieser Halbkreise, die Ausschnitte aus je einem Spektrum sind, hängt von der Stellung der beiden Kollimatorröhren ab. Diese, die auf einem Gestell mit Gradeinteilungen ruhen, sind in ihrer Stellung gegen das die Spektren entwerfende Prisma verschieblich. An zwei Gradeinteilungen kann der Grad abgelesen werden, um den bei jeder Verschiebung das zugehörige Kollimatorrohr gegen das Prisma verschoben

worden ist. Der Apparat ist derart eingerichtet, dass bestimmten Wellenlängen, die im Okularrohr eingestellt sind, bestimmte Ablesungen an den Gradeinteilungen entsprechen, so dass man durch bestimmte Verschiebung der Kollimatorröhren in jedem Halbkreise eine Spektralfarbe von gewünschter Wellenlänge einstellen kann.

Vermittelst der Bestimmung des der Lithium-, Natrium-, Thallium-, Wasserstoff β- und Strontiumlinie an den beiden Gradeinteilungen entsprechenden Ortes wurde vor Beginn der Untersuchungen ein für alle Mal durch das ganze Spektrum für Licht jeder Wellenlänge der zugehörige Ort an den Gradeinteilungen für Kollimatorrohr I und II bestimmt und in einer Tabelle notiert, die mich jederzeit in den Stand setzte beide Halbkreise des Okularrohrs durch Licht jeder gewünschten Wellenlänge zu erleuchten.

Den an den verschiedenen Tagen durch die unvermeidlichen Tageslichtwankungen der Temperatur auftretenden Fehlern bei Einstellung einer bestimmten Wellenlänge wurde dadurch begegnet, dass täglich zu Beginn der Untersuchung der der Natriumlinie an den Gradeinteilungen entsprechende Ort kontrolliert wurde, und der Grad seiner jedesmaligen Verschiebung in der Tabelle auch für die Orte der Lichter der übrigen Wellenlängen in Betracht gezogen wurde. Die Intensität der Farbenfelder im Okularrohr kann durch die vor den Lichtquellen befindlichen Spalte variert werden.

Es ist ein kleiner Spiegel zwischen Linse des Kollimatorrohrs III und Prisma, der das von Spalt l_3 kommende, weisse Licht auf das vom erleuchteten Spalt l_1 herrührende, rechte Farbenfeld des Okularrohrs reflektiert.

Wird die obere Hälfte des Spiegels verdeckt, so reflektiert seine unter Hälfte das vom Spalt l_3 kommende weisse Licht entsprechend nur auf die obere Hälfte des rechten Farbenfeldes im Okularrohr, welches dann eine untere gesättigtere und eine obere' durch die Zumischung des weissen Lichtes weniger gesättigte Hälfte zeigt.

Je breiter l_3, desto geringer der Sättigungsgrad der oberen Hälfte des rechten Farbenfeldes.

Um sehr niedrige Helligkeiten von Vergleichslichtern und des zuzumischenden Weiss zu erzielen, werden zwischen Spalt l_2 und l_3 und zugehörigen Auerbrennern rauchgraue Gläser eingeschaltet.

Die gleichmässige Abschwächung des ganzen Spektrums wird hergestellt, indem der Auerbrenner vor Spalt l_1 entfernt wird. Statt dessen wird in einem spitzen Winkel zum Spalt eine Glastafel gesetzt, die, nachdem sie vorher mit weissem Papier überklebt worden ist, mit einer feinen Schicht Magnesiumoxyd*) überzogen wird.

Dem von dem Spalt entfernten Auerbrenner wird eine solche Stellung gegeben, dass er die Magnesiumtafel gleichmässig und schwach erleuchtet. Das von ihr in den Spalt des Kollimatorrohrs I reflektierte Licht wird dann vom Prisma zerlegt.

---

*) Vgl. A König, Gräfes Archiv Bd. 30 (2), 1884 und Wiedem. Annal. Bd. 22. S. 572. 1884.

Man kann den Auerbrenner von der Magnesiumtafel so weit entfernen, dass das reflektierte Licht so schwach wird, dass es nach der Zerlegung durch das Prisma nicht mehr als Farbenspektrum gesehen wird, sondern gleichmässig farblos erscheint, d. h. das Spektrum ist so lichtschwach geworden, dass die Helligkeit jeder Stelle desselben unter der Reizschwelle der Zapfen unseres Auges liegt und nur auf die Stäbchen desselben wirken kann.

Die Lichter der verschiedenen Wellenlängen unterscheiden sich dann für unser Auge nur noch durch ihre Intensität nicht durch ihre Farbe.

Bei dieser Versuchsanordnung ist aus dem Metallansatz des Blechcylinders desjenigen Auerbrenners, der die Magnesiumtafel gleichmässig erleuchtet, die Linse entfernt. Voraussetzung dieser Anordnung ist, dass die Magnesiumtafel das weisse Licht des Auerbrenners in gleicher spektraler Zusammensetzung reflektiert, was auch A. König und C. Dieterici nachgewiesen haben.

K ist ein schwarzer Kasten, der zur Vermeidung alles Nebenlichtes über Prisma, die Anfangsteile der vier Rohre und den kleinen Spiegel des Apparates gesetzt ist.

§ 5.

Untersuchungsmethode zur Bestimmung der relativen Helligkeitsverteilung des helladaptierten, rotblinden Auges im Spektrum des Auerbrenners entsprechend der Methode der heterochromen Photometrie und Versuchsergebnisse.

Die Versuchsanordnung schliesst sich eng an die A. Königs in seiner bereits mehrfach citierten Arbeit*) an

Der linke Halbkreis im Okularrohr, der von Spalt l_2 sein Licht bezog, wurde an Farbe und Intensität konstant gehalten, während der rechte Halbkreis, der vom Spalt l_1 sein Licht bezog, die verschiedensten Farben zeigte, die mit der Farbe des anstossenden Halbkreises auf ihre Helligkeit verglichen werden sollten.

Stellung und Spaltbreite von Kollimatorrohr II blieben also konstant und bestimmten im Okularrohr das Vergleichslicht nach Farbe und Helligkeit, während Stellung und Spaltbreite des Kollimatorrohrs I und somit Wellenlänge und Helligke it in der rechten Gesichtsfeldhälfte des Okularrohrs variiert wurden.

Als Vergleichslicht benutzte ich in den verschiedenen Versuchen Lichter der Wellenlängen 620, 580, und 520 $\mu\,\mu$. Verglichen wurden bei jedem Versuch Lichter der Wellenlängen 680—480 $\mu\,\mu$ in Abständen von je 20 $\mu\,\mu$, also λ 680, 660, 500, 480 $\mu\,\mu$ und zwar in der Weise dass jedesmal dem Kollimatorrohr I zuerst diejenige Stellung gegeben wurde, dass in der entsprechenden Gesichtsfeldhälfte des Okularrohrs Licht derselben Wellenlänge eingestellt war, wie die des Vergleichs-

*) Vergl. S. 6 Anmerkung 1.

lichtes war, dann wurden nacheinander die Lichter der übrigen Wellenlängen eingestellt und zwar so, dass zuerst die Lichter der warmen Spektralhälfte, dann die der kalten der Reihe nach eingestellt wurden.

Im ersten Fall, wo die am rechten Halbkreis des Okularrohrs eingestellte Wellenlänge und die des Vergleichslichtes die gleichen waren, musste dann bei Einstellen auf gleiche Helligkeit der im Okularrohr anstossenden Halbkreise die Spaltbreite am Kollimatorrohr I dieselbe sein, wie die an Kollimatorrohr II. Ganz genau war es fast nie der Fall, da die beiden Auerbrenner nie genau dieselbe Intensität hatten und die Einstellungen ebenfalls von geringer Ungenauigkeit waren.

In den andern Fällen, wo die Wellenlängen der verglichenen Lichter verschieden waren von der des Vergleichslichtes, waren bei gleicher Spaltbreite an beiden Kollimatorröhren die anstossenden Halbkreise im Okularrohr von verschiedener Helligkeit und zum Teil auch für mein rotblindes Auge von verschiedener Farbe.

Um nun den Helligkeitswert von Lichtern, der verschiedenen Wellenlängen zu bestimmen, änderte ich am Kollimatorrohr I die Spaltbreite so lange, bis für das Licht der eingestellten Wellenlänge und das Vergleichslicht beide Halbkreise im Okularrohr die gleiche Helligkeitsempfindung hervorriefen

Bei jedem der verschiedenen Lichter, die sich durch ihre Wellenlänge unterschieden, war dann die Spaltbreite am Kollimatorrohr I eine andere.

Diese verschiedenen Spaltbreiten waren dann die an Helligkeit gleichwertigen Spaltbreiten der verschiedenen Farben des Auerbrennerspektrums.

Die relativen Helligkeitswerte der Spektralfarben selbst wurden folgendermassen erhalten:

War die konstant gehaltene Spaltbreite am Kollimatorrohr II gleich c, die am Kollimatorrohr I eingestellten, gleichwertigen Spaltbreiten der Helligkeit für die Lichter der verschiedenen Wellenlänge, v, v_1, v_2, u. s. f. so ist das Helligkeitsverhältnis zwischen dem Vergleichslicht bestimmter Wellenlänge und den verglichenen Lichtern entsprechend $\frac{c}{v}$, $\frac{c}{v_1}$, $\frac{c}{v_2}$ u. s. f.

Wird der Helligkeitswert des Vergleichslichtes von bestimmter Wellenlänge λ gleich 1 gesetzt so sind $\frac{c}{v}$, $\frac{c}{v_1}$, $\frac{c}{v_2}$ u. s. f. die relativen Helligkeitswerte der entsprechenden, verglichenen Lichter verschiedener Wellenlänge in Bezug auf den Helligkeitswert 1 des Vergleichslichtes von der Wellenlänge λ. Je nachdem das verglichene Spektrallicht grösseren resp. kleineren Helligkeitswert als das Vergleichslicht hat, und die gleichwertige Spaltbreite der Helligkeit v kleiner resp. grösser als c ist, ist der den Helligkeitswert angebende Bruch $\frac{c}{v}$ grösser resp. kleiner, als 1.

Waren die Wellenlänge des verglichenen Lichtes und die des Vergleichslichtes gleich, so mussten auch die Spaltbreiten an den Kollimatorröhren I und II gleich sein. Dies war, wie erwähnt, fast nie genau der Fall, d. h. die Spaltbreite am Kollimatorrohr I, c_1, war auch in diesem Fall ein wenig verschieden von der am Kollimatorrohr II. Ich hätte für den Helligkeitswert von Licht derselben Wellenlänge λ, wie die des Vergleichslichtes war, einen Bruch $\frac{c}{c_1}$ erhalten, während ich den Helligkeitswert des Lichtes von der Wellenlänge λ gleich 1 setzen wollte.

Um ihn gleich 1 setzen zu können, bezog ich daher die gleichwertigen Spaltbreiten der Helligkeit der Lichter der verschiedenen Wellenlängen auf die Spaltbreite c_1 am Kollimatorrohr I für die Wellenlänge λ des Vergleichslichtes.

Ich bekam dann für die verschiedenen Spektrallichter die Helligkeitswerte $\frac{c_1}{v}$, $\frac{c_1}{v_1}$, $\frac{c_1}{v_2}$, u. s. f.

Die Helligkeitsvergleichungen, resp. Einstellungen der Lichter verschiedener Wellenlänge auf gleiche Helligkeit mit den in den verschiedenen Versuchen verschieden gewählten Vergleichslichtern von der Wellenlänge 520, 580 und 620 $\mu\mu$ waren zum grössten Teil sehr leicht, da die beiden anstossenden Halbkreise im Okularrohr für mich meist gleiche Farbe zeigten. Nur bei den Lichtern von 500 und 480 $\mu\mu$ Wellenlänge waren die Helligkeitsvergleichungen nicht ganz leicht, da mir Lichtwen 500$\mu\mu$ Wellenlänge farblos, solches von 480$\mu\mu$ blau erschien, während ich das Vergleichslicht stets gelb sah. Doch konnten auch an diesen Stellen die Einstellungen mit hinreichender Sicherheit ausgeführt werden.

Die Zahlen für die gleichwertigen Spaltbreiten sind in den folgenden Tabellen die Mittelwerte aus den in 10 Einstellungen, bei λ 480 $\mu\mu$ aus den in 15—20 Einstellungen erhaltenen Zahlenwerten. An diesem Punkt wurden wegen der grösseren Schwierigkeit der Helligkeitsvergleichungen zahlreichere Einstellungen gemacht.

Die Tabellen I—VI enthalten die aus sechs verschiedenen Versuchen erhaltenen Ergebnisse. Es enthält Kolumne 1 der Tabellen die verschiedenen mittelst Kollimatorrohr I eingestellten Wellenlängen λ λ, Kolumne 2 die Zahlenwerte der mit dem Vergleichslicht an Helligkeit gleichwertigen Spaltbreiten der Lichter dieser Wellenlängen, Kolumne 3 ihre relativen Helligkeitswerte.

Ueber jeder Tabelle steht die Versuchsanordnung des ihr entsprechenden Versuches, d. h. Wellenlänge λ des Vergleichslichtes und der Spaltbreitenwert am Kollimatorrohr II.

In jeder Tabelle finden sich einige Worte unter der Rubrik „gleichwertige Spaltbreiten" in Klammern gesetzt, Der Helligkeitswert der entsprechenden Spektralstellen war für mich in Bezug auf das Vergleichs-

licht so gering, dass an diesen Stellen die gleichwertige Spaltbreite der Helligkeit so weit geworden wäre, dass dadurch der betreffende Spektralteil unrein in das Okularrohr gekommen wäre.

Es ist daher für die spektralen Lichter von für mein Auge sehr geringer Lichtintensität in den verschiedenen Versuchen die sonst konstant gehaltene Spaltbreite des Kollimatorrohrs II verengert worden und die Helligkeit des Vergleichslichtes, dessen Wellenlänge selbstverständlich konstant blieb, dadurch so weit herabgesetzt worden, dass die gleichwertigen Spaltbreiten der Helligkeit für die erwähnten spektralen Lichter nun innerhalb der Grenzen fielen, dass sie selbst rein ins Okularrohr kamen.

Die Zahlenwerte der gleichwertigen Spaltbreiten der Helligkeit, welche sich nun auf das Vergleichslicht niederer Intensität beziehen, sind in den entsprechenden Kolumnen der Tabelle I—VI in eckige Klammern gesetzt worden.

In jedem der den unten angegebenen Versuchsergebnissen entsprechenden Versuche hatte also das Vergleichslicht zwei verschiedene Intensitätsgrade. Mit dem Vergleichslicht niederer Intensität wurden die Spektrallichter von für mein Auge niederer Intensität verglichen; also in der Regel, wie aus den sechs folgenden Tabellen hervorgeht, Lichter von 680, 660, 640 und 480 $\mu\,\mu$ Wellenlänge.

Alle übrigen Spektralstellen wurden in einem und demselben Versuch mit dem Vergleichslicht höherer Intensität verglichen, bis auf eine Ausnahme in Versuch II s. u. Tabelle II, wo grade bei den Lichtern höherer Intensität, von den Wellenlängen 560 und 540 $\mu\,\mu$, die Spaltbreite des Kollimatorrohrs II geändert und zwar hier erweitert werden musste, da sich sonst an diesen Punkten die gleichwertigen Spaltbreiten der Helligkeit zu sehr dem Nullpunkt des Spaltes genähert hätten und die Resultate zu ungenau ausgefallen wäre.

Der Spaltbreitenwert am Kollimatorrohr II für das Vergleichslicht niederer Intensität ist über jeder Tabelle in eckigen Klammern angegeben, in Tabelle II entsprechend, der Spaltbreitenwert am Kollimatorrohr II für das Vergleichslicht höherer Intensität.

Die in den Kolumnen der einzelnen Tabellen in eckigen Klammern befindlichen Zahlenwerte für die gleichwertigen Spaltbreiten der Helligkeit der verschiedenen Spektrallichter beziehen sich also auf den in eckiger Klammer über den Tabellen vermerkten Zahlenwerte der Spaltbreite am Kollimatorrohr II. Der Helligkeitswert der entsprechenden Spektralstellen wurde anolog zu den andern bestimmt durch das Verhältnis des über der Tabelle in Klammern angegebenen Spaltbreitenwerts und der in Klammern angegebenen Werte der gleichwertigen Spaltbreiten der Helligkeit.

Dabei besteht allerdings die Ungenauigkeit, dass die in den Kolumnen eingeklammerten Werte direkt in Beziehung gesetzt wurden zu dem über der Tabelle befindlichen eingeklammerten Spaltbreitenwert

am Kollimatorrohr II, während die nicht eingeklammerten Werte in den Kolumnen in Beziehung gesetzt wurden zu dem, von dem am Kollimatorrohr II etwas abweichenden, Spaltbreitenwert am Kollimatorrohr I für dasjenige verglichene Licht, dessen Wellenlänge mit der des Vergleichslichtes übereinstimmte.

So sind in Versuch I, s. Tabelle I, die nicht eingeklammerten Werte der gleichwertigen Spaltbreiten der Helligkeit nicht bezogen auf den Spaltbreitenwert 42 am Kollimatorrohr II, sondern, wie oben auseinandergesetzt, auf die Spaltbreite 41,0 am Kollimatorrohr I für Licht von mit der des Vergleichslichtes übereinstimmender Wellenlänge von 620 $\mu\,\mu$, welche am Kollimatorrohr I eingestellt war.

Ich hätte also dementsprechend in Tabelle I die in der Kolumne 2 eingeklammerten Zahlenwerte auch nicht direkt, wie ich es gethan habe in Beziehung setzen dürfen zu dem über der Tabelle I eingeklammerten Spaltbreitenwert 2 am Köllimatorrohr II, sondern genauer zu dem Spaltbreitenwert $2\,\frac{41}{42}$. Da diese Umrechnung das Resultat, d. h. die Bestimmung des Helligkeitsverhältnisses der verschiedenen Spektrallichter nicht wesentlich beeinflusste, konnte sie unterbleiben, was auch hier wie in den übrigen Tabellen geschah, für die sämtlich mit andern Zahlen das Gleiche gilt.

Tabelle I.

Versuch I.
Kollimatorrohr II. Vergleichslicht λ 620 $\mu\mu$. Spaltbreite 42 [2].

Kollimat. I λ $\mu\mu$	Gleichwertige Spaltbreiten der Helligkeit	Relative Helligkeitswerte
680 „	[55.5]	0.03
660 „	[19.5]	0.10
640 „	113.0	0.36
620 „	41.0	1.—
600 „	14.6	2.80
580 „	9.5	4.30
560 „	8.9	4.60
540 „	11.3	3.60
520 „	19 0	2.20
500 „	42.0	0.98
480 „	78.5	0.52

Tabelle II.

Versuch II.
Kollimatorrohr II. Vergleichslicht λ 620 $\mu\mu$ Spaltbreite 27 [47].

Kollimat. I λ $\mu\mu$	Gleichwertige Spaltbreiten der Helligkeit.	Relative Helligkeitswerte
640 „	82.0	0.30
620 „	27.0	1.—
600 „	10.5	2.50
580 „	7.0	3.80
560 „	[9.0]	5.00
540 „	[11.0]	4.40
520 „	9.5	2.80
500 „	23.5	1.10
480 „	49.0	0,60

Tabelle III.

Versuch III.
Kollimatorrohr II. Vergleichslicht λ 520 $\mu\mu$ Spaltbreite 42 [2].

Kollimat I λ $\mu\mu$	Gleichwertige Spaltbreiten der Helligkeit	Relative Helligkeitswerte
680 „	[133.0]	0.02
660 „	[72.0]	0.03
640 „	[26.0]	0.08
620 „	84.0	0.50
600 „	40.0	1.70
580 „	23 0	1.86
560 „	24.0	1.78
540 „	25.6	1.76
520 „	42.7	1.—
500 „	87.0	0.56
480 „	[24.5]	0.08

Tabelle IV.

Versuch IV.

Kollimatorrohr II. Vergleichslicht λ 580 $\mu\mu$. Spaltbreite 27 [7].

Kollimatorrohr I λ μ μ	gleichwertige Spaltbreiten der Helligkeit	relative Helligkeitswerte
660 „	[133.0]	0.05
640 „	[58.0]	0.12
620 „	62.0	0.40
600 „	29.0	0.90
580 „	16.4	1.60
560 „	15.0	1.80
540 „	17.0	1.60
520 „	27.6	1.—
500 „	63.0	0.40
480 „	[50.0]	0.14

Tabelle V.

Versuch V.

Kollimatorrohr II. Vergleichslicht λ 580 $\mu\mu$. Spaltbreite 42 [7].

Kollimatorrohr I λ μ μ	gleichwertige Spaltbreiten der Helligkeit	relative Helligkeitswerte
640 „	[97.0]	0.07
620 „	153.0	0.25
600 „	67.0	0.57
580 „	39.0	1.—
560 „	33.5	1.17
540 „	40.0	0.98
520 „	62,0	0.60
500 „	142.0	0.27
480 „	[79.0]	0.09

Tabelle VI.

Versuch VI.

Kollimatorrohr II. Vergleichslicht λ 580 $\mu\mu$. Spaltbreite 27 [2].

Kollimatorrohr I λ μ μ	gleichwertige Spaltbreiten der Helligkeit	relative Helligkeitswerte
660 „	[137.0]	0.015
640 „	[50.0]	0.04
620 „	107.0	0.24
600 „	41,4	0.60
580 „	26.0	1.—
560 „	25.3	1.03
540 „	28.0	0.93
520 „	42.6	0.60
500 „	100.0	0.26
480 „	[30.0]	0.07

§ 6.

Betrachtung der in § 5 gewonnenen Resultate.

Wie man aus den Tabellen ersieht, fand ich in allen Versuchen bis auf Versuch III das Helligkeitsmaximum bei Licht von 560 $\mu\mu$ Wellenlänge.

Doch sind die Differenzen der Zahlenwerte der gleichwertigen Spaltbreiten der Helligkeit bei den Spektrallichtern von 580, 560 und 540 $\mu\mu$ Wellenlänge so gering, dass sie ins Bereich der Beobachtungsfehler fallen. Da jedoch fast jedesmal das Helligkeitsmaximum bei Licht von 560 $\mu\mu$ Wellenlänge angegeben ist, kann man annehmen, dass es auch thatsächlich dort liegt.

Um die Genauigkeit der Messungen in den verschiedenen Versuchen zu prüfen, kann man in den ersten vier Versuchen den Helligkeitswert von Licht von 580 $\mu\mu$ Wellenlänge gleich 1 setzen, wie es in den beiden letzten Versuchen geschehen ist, und darauf die Helligkeitswerte der übrigen Spektrallichter umrechnen.

Es lassen sich dann die relativen Helligkeitswerte der verschiedenen spektralen Lichter, die man in den einzelnen Versuchen gefunden hat, sehr gut miteinander vergleichen.

Bei hinreichender Genauigkeit der Methode müssen dann die in den verschiedenen Versuchen gefundenen Helligkeitswerte von Licht ein und derselben Wellenlänge wenigstens annähernd übereinstimmen, was auch mit wenigen, aus Tabelle VII zu entnehmenden Ausnahmen hinreichend der Fall ist.

Der Durchschnitt aus den in den 6 Versuchen gewonnenen Zahlenwerten der relativen Helligkeit von Licht ein und derselben Wellenlänge, bezogen auf den Helligkeitswert 1 von Licht von 580 $\mu\mu$ Wellenlänge, wurde als der eigentliche Helligkeitswert dieses Lichtes angesehen.

Die so gefundenen Zahlenwerte der eigentlichen, relativen Helligkeit der Spektrallichter wurden sämtlich, da dadurch das gegenseitige Helligkeitsverhältnis derselben sich nicht änderte, mit 10 multipliziert, und diese mit 10 multiplizierten, eigentlichen Helligkeitswerte der Kurve II auf der der Arbeit anhängenden Tafel zu Grunde gelegt, indem sie als Ordinaten über den zugehörigen Wellenlängen, die die Abscissenaxe bilden, aufgetragen sind.

Es ist demnach die Kurve II der anhängenden Tafel die Kurve der Helligkeitsverteilung des Rotblinden im Auerbrennerspektrum bei helladaptiertem Auge, gefunden nach der Methode der heterochromen Photometrie.

In der folgenden Tabelle VII bedeutet die erste Kolumne wieder die verschiedenen Wellenlängen, die nächsten 4 Kolumnen, die aus den ersten vier Versuchen gefundenen, aber auf den Helligkeitswert 1 von Licht von 580 $\mu\mu$ Wellenlänge umgerechneten Helligkeitswerte, die beiden nächsten Kolumnen die in Versuch V und VI gefundenen Helligkeitswerte. Die vorletzte Kolumne enthält die Durchschnittswerte der in

der entsprechenden Horizontalen angegebenen Helligkeitswerte, also die eigentlichen Helligkeitswerte, während die letzte Kolumne die mit 10 multiplizierten Werte der vorletzten enthält, die in der besprochenen Weise der Kurve II zu Grunde gelegt wurden.

Tabelle VII.

Kollimat. I.	Helligkeitswerte berechnet aus Versuch				Helligkeitswerte gefunden aus Versuch		Durchschnittlicher eigentlicher) Helligkeitswert	Mit 10 multiplizierte durchschnittliche Helligkeitswerte
$\lambda\ \mu\mu$	I	II	III	IV	V	VI		
640 „	0.08	0.08	0.04	0.08	0 07	0.04	0.07	0.7
620 „	0.21	0.23	0.27	0.25	0.25	0.24	0.24	2.4
600 „	0.66	0.65	0.91	0.56	0.57	0.60	0 66	6.6
580 „	1.—	1.—	1.—	1.—	1.—	1.—	1.—	10.0
560 „	1.30	1.07	0.96	1.13	1 17	1.03	1.11	11.1
540 „	1.16	0.84	0.95	1.00	0.98	0.93	0 98	9.8
520 „	0.74	0 50	0.54	0.63	0 60	0.60	0.60	6.0
500 „	0.29	0.24	0.27	0 25	0.27	0.26	0.26	2.6
480 „	0.16	0.12	0.04	0.09	0.09	0.07	0.10	1.0

§ 7.

Untersuchungsmethode zur Bestimmung der relativen Helligkeitswerte der Spektralfarben bei hoher Intensität derselben entsprechend der Vierordtschen Methode und Versuchsergebnisse.

Hierzu war eine Lichtquelle nötig, die weisses Licht auf das Spektrum einer anderen Lichtquelle warf.

Dies wurde, wie schon erwähnt, erreicht durch den Auerbrenner vor dem Kollimatorrohr III und den kleinen, halbverdeckten Spiegel s, der das vom Spalt l_3 kommende weisse Licht auf die obere Hälfte des vom Auerbrenner vor Kollimatorrohr I stammenden Spektrums warf. Durch Verschiebung des Kollimatorrohrs I konnte jede beliebige Spektralfarbe, deren Helligkeitswerth geprüft werden sollte, mit diesem weissen Lichte gemischt werden. Innerhalb eines und desselben Versuchs nach dieser Methode war also die Stellung des Kollimatorrohrs I variabel, seine Spaltbreite l_1 wurde dagegen konstant gehalten.

Je grösser die Helligkeit einer eingestellten Spektralfarbe war, um so mehr Weiss musste durch den Spalt l_3 gehen, um einen eben merklichen Sättigungsunterschied zwischen der oberen, durch das zugemischte Weiss veränderten und der unteren unveränderten Hälfte der Spektralfarbe hervorzurufen; d. h. je heller die eingestellte Spektralfarbe war, desto breiter musste Spalt l_3 gemacht werden, damit ein eben merklicher Sättigungsunterschied in den beiden Hälften der eingestellten Spektralstelle entstand.

Die dabei für die verschiedenen Spektralfarben verschieden gross gefundenen Spaltbreiten von l_3 waren ein direktes Mass ihrer Unterschiedsschwellen für Zumischung von weissem Auerlicht und zugleich ein Mass ihrer relativen Helligkeitswerte.

Wurde für die Unterschiedsschwelle c an einer bestimmten Stelle £ des Spektrums der Helligkeitswert dieser Stelle gleich 1 gesetzt, und sind v, v_1, v_2, u. s. f. die Unterschiedsschwellen an den übrigen Spektralstellen, so sind $\frac{v}{c}$ $\frac{v1}{c}$ $\frac{v2}{c}$ u. s. f. hier die relativen Helligkeitswerte der verschiedenen Spektralstellen in Bezug auf den Helligkeitswert 1 der Spektralstelle £.

Während v. Vierordt diejenige zugemischte Weissmenge als Mass des Helligkeitswertes benutzte, die eben keinen merklichen Unterschied mehr zwischen der mit dem weissen Licht gemischten und der von ihm nicht betroffenen Stelle eines und desselben Spektralbezirkes hervorrief, wählte ich diejenige Weissmenge, die eben einen Sättigungsunterschied dieser beiden Stellen bewirkt.

Die ersten Versuche zeigten, dass das unmittelbar durch den Spalt l_3 gegangene, weisse Auerlicht für diese Untersuchungen viel zu intensiv war, da die Spaltbreiten l_3 selbst an den hellsten Spektralstellen, an denen ein eben merklicher Sättigungsunterschied durch das zugemischte Weiss hervorgerufen worden war, ausserordentlich klein war.

Dem Uebelstande wurde dadurch abgeholfen, dass eine während eines und desselben Versuches konstant gehaltene Rauchgrauglaserkombination zwischen Auerbrenner und Spalt l_3 des Kollimatorrohrs III eingeschoben wurde, die das zugemischte Weiss derartig schwächte, dass an den verschiedenen Spektralstellen die Spaltbreiten l_3 hinreichend gross wurden.

Die in den folgenden Tabellen VIII—X zahlenmässig in Spaltbreitenwerten angegebenen, zugemischten Weissmengen in der Region von 580—540 $\mu\mu$ Wellenlänge, die wie die übrigen Durchschnittswerte aus den in je 30 Einstellungen gewonnenen Zahlenwerten sind, zeigen sehr geringe Unterschiede, die jedenfalls noch in das Bereich der Beobachtungsfehler fallen.

Da ausserdem bei jedem dieser 3 Versuche, wie aus den bereits angeführten Tabellen ersichtlich, das Helligkeitsmaximum an eine andere Stelle verlegt wurde, einmal nach Licht von 580, einmal nach Licht von 560 und einmal nach Licht von 540 $\mu\mu$ Wellenlänge, so wurden für diese drei Punkte noch ganz besonders 2 Versuche (Tab. XI und XII), angestellt, um aus einer grösseren Anzahl von Versuchen zu ersehen, wohin nach dieser Methode am häufigsten das Maximum der Helligkeit im Auerbrennerspektrum verlegt würde, und um den aus den verschiedenen Versuchen zu bestimmenden, durchschnittlichen, relativen Helligkeitswert der Lichter dieser Wellenlängen etwas genauer angeben zu können.

Untersucht wurde der Helligkeitswert der Lichter einer etwas

kleineren Spektrumstrecke als in § 5, nämlich die Strecke die die Lichter von 620—480 $\mu\mu$ Wellenlänge umfasst, in Abständen von 20 $\mu\mu$.

Die verschiedenen fünf Versuche nach dieser Methode, deren Resultate Tabelle VIII—XII enthalten, unterscheiden sich entweder durch die Verschiedenheit der Rauchgläserkombination vor dem Spalt l_3 oder die Grösse der Spaltbreite des Kollimatorrohrs I, die jedoch beide während eines und desselben Versuches selbstverständlich konstant gehalten wurden.

In den Tabellen enthält Kolumne 1 die Lichter der verschiedenen Wellenlängen, deren relative Helligkeitswerte bestimmt wurden, Kolumne 2 die Zahlenwerte für die Grösse der Spaltbreiten l_3, die je grösser um so mehr weisses Licht durchliessen, Kolumne 3 die relativen Helligkeitswerte in Bezug auf den Helligkeitswert 1 für Licht von 580 $\mu\mu$ Wellenlänge.

Die Zahlenwerte der Kolumne 2 sind, wie schon oben angedeutet, das Mittel aus in je dreissig Einstellungen erhaltenen Zahlen.

Tabelle VIII.

Versuch I.

λ $\mu\mu$	Zugemischte Weissmengen in Spaltbreiten	Relative Helligkeitswerte.
620 „	8.7	0.51
600 „	13.4	0.79
580 „	17.0	1.—
560 „	17,2	1.01
540 „	15.6	0,92
520 „	11.9	0,70
500 „	8.4	0.49
480 „		

Tabelle IX.

Versuch II

λ $\mu\mu$	Zugemischte Weissmengen in Spaltbreiten	Relative Helligkeitswerte
620 „	23.0	0.42
600 „	40 6	0.73
580 „	55.3	1.—
560 „	56.0	1.01
540 „	56.2	1.02
520 „	44.4	0.80
500 „	26.2	0.47
480 „	13.0	0.24

Tabelle X.

Versuch III.

λ μμ	Zugemischte Weissmengen in Spaltbreiten	Relative Helligkeitswerte.
620 „	27.3	0.56
600 „	—	—
580 „	48.6	1.—
560 „	45 0	0.93
540 „	47.6	0.98
520 „	—	—
500 „	28.5	0.59

Tabelle XI.

Versuch IV.

λ μ μ	Zugemischte Weissmengen in Spaltbreiten	Relative Helligkeitswerte
580 „	53.0	1.—
560 „	64.0	1.21
540 „	55.0	1.04

Tabelle XII.

Versuch V.

λ μμ	Zugemischte Weissmengen in Spaltbreiten	Relative Helligkeitswerte
580 „	40.0	1.—
560 „	46.0	1.15
540 „	44.0	1,10

§ 8.

Betrachtung der in § 7 erhaltenen Resultate.

Aus dem Vergleich der Tabelle VIII—X ersieht man, dass die, in den drei verschiedenen Versuchen nach der Vierordtschen Methode gefundenen, Helligkeitswerte der untersuchten Spektrallichter hinreichend gut mit einander übereinstimmen. Allerdings liegt das Maximum der Helligkeit wie schon oben angedeutet, in jedem Versuch wo anders. In Versuch I (Tabelle VIII) bei λ 560 μ μ, Versuch II (Tabelle IX) bei λ 540 μ μ und Versuch III (Tabelle X) bei λ 580 μ μ. In zwei weiteren Versuchen, die nur die Helligkeitsvergleichung dieser drei Punkte ins Auge fassten, Versuch IV und V (Tabelle XI und XII) wurde das Helligkeitsmaximum beide Mal bei λ 560 μ μ gefunden. Also auch nach dieser Methode verlegte ich meist, in drei unter fünf Versuchen, das Helligkeitsmaximum nach derjenigen Spektralstelle, dessen Licht 560 μ μ

Wellenlänge hatte, obgleich es nach der Vierordtschen Methode nicht mit derselben Sicherheit nach dieser Spektralstelle verlegt wurde, wie nach der Methode der heterochromen Photometrie, nach der es in sechs Versuchen fünf mal dorthin verlegt wurde.

Bedenkt man, dass die Spektralstellen von 580, 560 und 540 $\mu\,\mu$ Wellenlänge für mein Auge fast gleich hell sind, so musste auch die Methode der heterochromen Photometrie an diesen Stellen sicherere und genauere Resultate geben, als die Vierordtsche Methode

Die Methode der Ebenmerklichkeit einer Sättigungsabnahme einer Spektralstelle durch Zumischung von weissem Licht, wie sie die Vierordtsche Methode der Helligkeitsmessung darstellt, ist eben doch nicht so leicht und so genau, wie die Helligkeitsvergleichung zweier gleichgefärbter Felder; denn für die in Betracht kommenden Lichter von 580, 560 und 540 $\mu\,\mu$ Wellenlänge, welche nach der ersten Methode in den verschiedenen Versuchen an Helligkeit verglichen wurden mit denen von 580, 620, 520 $\mu\,\mu$ Wellenlänge, handelte es sich ja für mein Auge thatsächlich nicht um die Methode der heterochromen, sondern vielmehr „isochromen" Photometrie.

Trotzdem sieht man jedoch, dass auch nach der Vierordtschen Methode das Helligkeitsmaximum meist an dieselbe Stelle verlegt wurde, wie bei der ersten Methode.

Der Uebersichtlichkeit wegen sind in Tabelle XIII die in den verschiedenen Versuchen nach der Vierordtschen Methode gefundenen und in Tabelle VIII-XII niedergelegten Resultate vergleichshalber noch einmal zusammen gestellt.

Kolumne 1 enthält wieder die Wellenlängen, Kolumne 2, 3, 4, 5, 6 die in den Tabellen VIII—XII angegebenen, relativen Helligkeitswerte.

Aus den, in den verschiedenen Versuchen für ein und dieselbe Spektralstelle gefundenen, Helligkeitswerten wurde der Durchschnitt genommen und als eigentlicher Helligkeitswert der betreffenden Spektralstelle betrachtet.

Diese durchschnittlichen oder eigentlichen Helligkeitswerte enthält die vorletzte Kolumne, deren Zahlen also der Durchschnitt der in der entsprechenden Horizontale der Tabelle angegebenen sind. Die in dieser Tabelle eingeklammerten Werte sind nicht durch direkte Beobachtung gefunden, sondern Mittelwerte aus den, in den beiden resp. drei ersten Versuchen (Tabelle VIII, IX, X) durch direkte Beobachtung gefundenen Werten. Der Helligkeitswert bei λ 480 $\mu\,\mu$ ist, wie man demnach aus dieser Tabelle ersieht, nach dieser Methode nur in einem Versuch, Versuch II, direkt ermittelt worden.

Die letzte Kolumne der Tabelle XIII enthält die in der vorletzten Kolumne, verzeichneten eigentlichen relativen Helligkeitswerte, multipliziert mit $\frac{11{,}1}{1{,}06}$; Das gegenseitige Helligkeitsverhältnis der Lichter der verschiedenen Wellenlängen wird dadurch nicht geändert. Die so multiplizierten relativen, eigentlichen Helligkeitswerte sind in der anhängenden

Tafel der Kurve I zu Grunde gelegt, indem sie als Ordinaten über den zugehörigen Wellenlängen des Spektrums, als Abscissenaxe, aufgetragen sind. Die Multiplikation hatte nur den Zweck das Maximum der beiden Kurven I u. II zusammenfallen zu lassen, um so besser vergleichen zu können, wie weit die nach 2 ganz verschiedenen Methoden gefundenen Kurven der Helligkeitsverteilung des Rotblinden im Auerbrennerspektrum hoher Intensität in ihrem Verlauf übereinstimmen. Die Kurve I ist also die Kurve der Helligkeitsverteilung des Rotblinden im Auerspektrum hoher Intensität, gefunden nach der Vierordtschen Methode.

Tabelle XIII.

$\lambda\ \mu\mu$	Helligkeitswerte gefunden in					Durchschnittl. Helligkeits-werte.	mit $\frac{11.1}{1.06}$ multipli-zirte durch-schnittliche Helligkeitswerte
	Vers. I. (TbVIII)	Vers. II. (Tb.IX.)	Vers.III. (Tb. X)	Vers. IV. (Tb.XI.)	Vers. V. (Tb.XII)		
620 „	0.51	0.42	0.56	(0 50)	(0.50)	0.50	5.2
600 „	0.79	0.73	(0.76)	(0.76)	(0.76)	0.76	8.0
580 „	1.—	1.—	1.—	1.—	1.—	1.—	10.5
560 „	1.01	1.01	0.93	1.21	1.15	1.06	11.1
540 „	0.92	1.02	0.98	1.04	1.10	1.01	10.6
520 „	0.70	0.80	(0.75)	(0.75)	(0.75)	0.75	7.9
500 „	0.49	0.47	0.59	(0.52)	(0.52)	0.52	5.4
480 „	(0.24)	0.24	(0.24)	(0.24)	(0.24)	0.24	2.5

In Tabelle XIV sind die nach den beiden Methoden gefundenen relativen Helligkeitswerte mit den Zahlenwerten, wie sie den Kurven I und II der anhängenden Tafel zu Grunde gelegt sind, zum Vergleich neben einander gestellt.

Die erste Kolumne dieser Tabelle enthält die verschiedenen Wellenlängen, die zweite die relativen Helligkeitswerte der Lichter dieser Wellenlängen, wie sie nach der Methode der heterochromen Photometrie gefunden und der Kurve II der anhängenden Tafel zu Grunde gelegt sind, Kolumne 3: die relativen Helligkeitswerte, wie sie nach der Vierordtschen Methode gefunden und der Kurve I zu Grunde gelegt sind.

Tabelle XIV.

$\lambda\ \mu\mu$	Relative Helligkeitswerte gefunden nach der Meth. der heterochromen Photometrie.	Relative Helligkeitswerte, gefunden nach der Vierordtschen Methode.
620 „	2.4	5.2
600 „	6.6	8.0
580 „	10.0	10.5
560 „	11.1	11.1
540 „	9.8	10.6
520 „	6.0	7.9
500 „	2.6	5.4
480 „	1.0	2.5

Ein Blick auf Tabelle XIV oder die Kurven I und II der Tafel zeigt dass erheblichere Unterschiede in den, nach den beiden verschiedenen Methoden gefundenen Resultaten nur bestehen bei λ 620, 500 und 480 $\mu\mu$.

Welche der beiden Kurven der Wahrheit näher kommt, kann ich nicht entscheiden; jedoch möchte ich annehmen, dass bei λ 620 $\mu\mu$ die Kurve II der Wahrheit näher kommt, da bei der Methode der heterochromen Photometrie dieser Punkt stets mit für mich gleichfärbigen Lichtern an Helligkeit verglichen wurde. Der Helligkeitswert dieses Punktes dürfte daher mittelst dieser Methode genauer bestimmt worden sein, als mittelst der Vierordtschen Methode, wie oben bereits näher ausgeführt worden ist. Bei den Punkten λ 500 und 480 $\mu\mu$ dürfte jedoch die Vierordtsche Methode genauere Resultate geben, da es auch mir nach der andern Methode immerhin nicht ganz leicht fiel, ganz verschiedene Farbenfelder auf ihre Helligkeit miteinander zu vergleichen. Das ist jedoch nur eine Vermutung, mit Bestimmtheit behaupten möchte ich es nicht, da es an der Hand der Kurven scheint, als ob bei der Vierordtschen Methode überall etwas zu hohe Werte gefunden worden sind.

§ 9.

Versuchsanordnung für die Untersuchung der relativen Helligkeitsverteilung im Spektrum sehr niederer Intensität nach der Methode der heterochromen Photometrie und Versuchsergebnisse.

In den früheren §§ 5, 6, 7 und 8 sind die beiden verschiedenen Versuchsmethoden zur Bestimmung der relativen Helligkeitswerte der Spektralfarben mit ihren Ergebnissen einander gegenüber gestellt für helladaptiertes Auge. In den folgenden Paragraphen handelt es sich um eine gleiche Gegenüberstellung für tiefe Dunkeladaptation des Auges; d. h. das Auge bedurfte in den folgenden Versuchen einer verhältnismässig langen Adaptationszeit für Dunkelheit, um das von einem Auerbrenner durch das Prisma des Apparates gegangene und zerlegte Licht wahrzunehmen, ohne dabei irgendwelche Farbenunterschiede in diesem zerlegten Licht bemerken zu können.

Das Spektrum war also so lichtschwach, dass das Auge es gleichmässig farblos sah, nur an den verschiedenen Stellen verschieden hell.

Wurde also in den vorigen Versuchen die Art der Helligkeitsverteilung, wie sie vorwiegend der Zapfenapparat meines Auges vornimmt, untersucht, so handelte es sich in den folgenden Versuchen um die Untersuchung der Helligkeitsverteilung des Stäbchenapparates meines Auges im Auerbrennerspektrum und zwar ebenfalls nach den beiden Methoden, wie sie für das helladaptierte Auge zur Verwendung kamen. Zunächst untersuchte ich nun wieder nach der Methode der heterochromen Photometrie, ein Name, der allerdings indiesem Fall für die Untersuchungsmethode garnicht bezeichnend ist, da ja die Lichter der verschiedenen Wellenlängen, die auf ihre Helligkeit hin miteinander verglichen wurden, gar keine verschiedene Farbe mehr hatten.

Das Vergleichslicht stammte wieder von dem Auerbrenner vor dem Kollimatorrohr II, dessen Stellung und Spaltbreite innerhalb eines und desselbelben Versuches konstant gehalten wurden. Die verschiedenen Spektrallichter, die mit dem Vergleichslicht an Helligkeit verglichen werden sollten, wurden durch Verschiebung des Kollimatorrohrs I gegen das Prisma erhalten und in der Reihenfolge eingestellt, dass in jedem Versuch zunächst Licht derselben Wellenlänge, die das Vergleichslicht hatte, eingestellt wurde und dann der Reihe nach die Lichter der übrigen Wellenlängen.

Das Vergleichslicht wurde durch Rauchgläser vor dem Spalt l_2 bis zur Farblosigkeit abgeschwächt, ohne dass ich Gewicht darauf legte die Reizschwelle des Vergleichslichtes zu erreichen. Das Licht des Auerbrenners vor dem Kollimatorrohr II wurde jedoch so weit geschwächt, dass bei jeder beliebigen Stellung desselben das ihm entsprechende Gesichtsfeld im Okularrohr farblos erschien.

Die Abschwächung der Helligkeit der mit dem Vergleichslicht zu vergleichenden Spektrallichter konnte nicht durch Rauchgläser geschehen, da diese ja Lichter verschiedener Wellenlängen verschieden stark absorbieren, so dass dadurch Spektralstellen, deren Licht weniger stark absorbiert wird, heller erschienen wären, als solche, die vielleicht stärker den Stäbchenapparat des Auges erregen, aber durch die Rauchgraugläser stärker absorbiert werden.

Sollte daher die Methode brauchbare Resultate geben, so musste das Spektrum des Auerbrenners vor Kollimatorrohr I in allen seinen Teilen gleichmässig abgeschwächt werden.

Diese gleichmässige Abschwächung wurde, wie in § 4 auseinandergesetzt wurde, dadurch erzielt, dass das, von einer mit Magnesiumoxyd überzogenen Tafel, in das Kollimatorrohr I hineinreflektierte Auerlicht zur Erzeugung des Spektrums verwendet wurde.

Je nachdem man den Auerbrenner mehr oder weniger von der Magnesiumoxydtafel entfernte, konnte man nach Belieben die gleichmässige Abschwächung des Spektrums verstärken oder verringern.

Eine Magnesiumoxydtafel wurde deswegen gewählt, weil diese das Licht in gleicher spektraler Zusammensetzung reflektiert.

Der Auerbrenner, dessen Licht von der Tafel reflektiert wurde, wurde bei den verschiedenen Versuchen nach dieser Methode stets in solcher Entfernung von der Tafel gehalten, dass das Spektrum des reflektierten Lichtes, selbst bei weiter, — aber brauchbarer — Spaltbreite l_1 für das Auge keine Farbenunterschiede zeigte.

Ich legte dabei nur auf Farblosigkeit des ganzen Spektrums Gewicht, ohne direkt die untere Reizschwelle der Spektralregionen erreichen zu wollen.

Die Helligkeitswerte der verschiedenen Spektralstellen des Spektrums sehr niederer Intensität wurden in der, in § 5 geschilderten Weise gefunden.

Bei den drei verschiedenen Versuchen, deren Ergebnisse Tabelle XV—XVII enthalten, verschob ich die Stellung des Auerbrenners

zur Magnesiumtafel und änderte Spaltbreite l_2, die beide während eines und desselben Versuches konstant gehalten wurden. Die Wellenlänge des Vergleichslichtes betrug in sämtlichen Versuchen 580 $\mu\,\mu$.

Das Zimmer war bei diesen und den weiter unten in § 11 geschilderten Versuchen verdunkelt, nur spärlich von den Auerbrennern des Apparates und einer kleinen Oellampe erleuchtet, mit deren Hilfe ich die Ablesungen am Apparat machte.

Die zu den Einstellungen erforderliche Dunkeladaptation meines Auges erzielte ich dadurch, dass ich eine schwarze Binde vor den Augen hatte, die nur zu den Einstellungen und Ablesungen am Apparat gelüftet wurde.

Die für die gleichwertigen Spaltbreiten der Helligkeit der verschiedenen Spektrallichter angegebenen Zahlenwerte in den Tabellen XV—XVII sind der Durchschnitt aus den in 20 Einstellungen erhaltenen.

In den genannten Tabellen enthält Kolumne 1 die verschiedenen, mittelst Kollimatorrohr I eingestellten Wellenlängen, Kolumne 2 die an Helligkeit gleichwertigen Spaltbreiten ihrer Lichter, Kolumne 3 ihre relativen Helligkeitswerte in dem meinem Auge farblos erscheinenden lichtschwachen Spektrum, bezogen anf den Helligkeitswert 1 von Licht von 500 $\mu\,\mu$ Wellenlänge.

In Versuch III (Tabelle XVII) sind nur die Punkte λ 540, 520 und 500 $\mu\,\mu$ beobachtet worden.

Tabelle XV.

Versuch I.

Kollimotorrohr I λ $\mu\,\mu$	gleichwertige Spaltbreiten der Helligkeit	Relative Helligkeitswerte
580 „	60.5	0.42
560 „	32.8	0.77
540 „	24.5	1.03
520 „	21.9	1.15
500 „	25.2	1.—
480 „	33.3	0.76
460 „	59.9	0.42

Tabelle XVI.

Versuch II.

Kollimotorrohr I λ $\mu\,\mu$	Gleichwertige Spaltbreiten der Helligkeit	Relative Helligkeitswerte
580 „	88.6	0.57
560 „	53.6	0 95
540 „	42.4	1.20
520 „	41.6	1.22
500 „	50.9	1.—
480 „	59.9	0.85
460 „	97.4	0,52

Tabelle XVII.

Versuch III.

Kollim. I λ $\mu\mu$	gleichwertige Spaltbreiten der Helligkeit	relative Helligkeitswerte
540 „	34.4	1.09
520 „	32.6	1.15
500 „	37.4	1.—

§ 10.

Betrachtung der in § 9 erhaltenen Resultate.

Vergleicht man die in den 3 Versuchen erhaltenen und in Tabelle XV- XVII verzeichneten Resultate. so sieht man dass sie hinlänglich gut übereinstimmen. Nur fallen, ähnlich wie bei den Untersuchungen mit helladaptiertem Auge zwischen λ 580—540 $\mu\mu$. hier bei den Untersuchungen mit tief dunkeladaptiertem Auge zwischen λ 540—500 $\mu\mu$ die Differenzen der an Helligkeit gleichwertigen Spaltbreitenwerte noch in das Bereich der Beobachtungsfehler. Doch wurde in allen drei Versuchen übereinstimmend das Maximum der Helligkeit bei λ 520 $\mu\mu$ gefunden.

In der folgenden Tabelle XVIII sind die in diesen Versuchen gefundenen relativen Helligkeitswerte der Lichter der verschiedenen Wellenlängen sehr niedriger Intensität zusammengestellt Kolumne 1 enthält die Wellenlängen. Kolumne 2. 3. 4 die in den drei Versuchen gefundenen relativen Helligkeitswerte. In der 4. Kolumne entsprechen die eingeklammerten Werte nicht direkter Beobachtung. sondern sind der Durchschnitt der in Kolumne 2 und 3 an entsprechender Stelle stehenden, durch Beobachtung direkt gefundenen, Werte.

Der Durchschnitt dieser, in den 3 Versuchen gefundenen Helligkeitswerte wurde wieder als eigentlicher Helligkeitswert betrachtet und ist in Kolumne 5 angegeben. Die letzte Kolumne enthält die mit $\frac{11.1}{1.17}$ multiplizierten, durchschnittlichen Helligkeitswerte, die in der bereits beschriebenen Weise zur Zeichnung einer Kurve und zwar der Kurve IV der Tafel benutzt wurden. Die Kurve IV stellt also die Art der Helligkeitsverteilung des Rotblinden im Dispersionsspektrum sehr niederer Intensität dar. gefunden nach der Methode der isochromen Photometrie.

Durch die Multiplikation der durchschnittlichen relativen Helligkeitswerte wurde erreicht, dass das Maximum dieser Kurve in der Tafel in gleiche Höhe mit dem Maximum der Kurven I u. II fiel, so dass der Unterschied im Verlauf dieser Kurven deutlicher verfolgt werden konnte.

Man sieht bei Betrachtung der Kurven,dass das Helligkeitsmaximum im Auerbrennerspektrum sehr niedriger Intensität. wie vorher zu erwarten war, nach dem stärker brechenden Teil des Spektrums und war nach Licht von

520 $\mu\mu$ Wellenlänge gewandert ist, und das relative Helligkeitsverhältnis zwischen lang- und kurzwelligem Licht sich zu Gunsten des letzteren verschoben hat.

Tabelle XVIII.

Kollim. I. λ $\mu\mu$	Relative Helligkeit gefunden in Versuch I	II	III	Durchschnittliche mit relative Helligkeitswerte.	$\frac{11.1}{1.17}$ multiplizierte durchschn. Helligkeitswerte.
580 „	0.42	0.57	(0.50)	0.50	4.7
560 „	0.77	0.95	(0.86)	0.86	8.2
540 „	1.03	1.20	1.09	1.11	10.5
520 „	1.15	1.22	1.15	1.17	11.1
500 „	1.—	1.—	1.—	1.—	9.5
480 „	0.76	0.85	(0.81)	0.81	7.7
460 „	0.42	0.52	(0.47)	0.47	4.5

§ 11.

Versuchsanordnung für die Untersuchung der Helligkeitsverteilung meines tief dunkeladaptierten Auges im Auerbrennerspektrum nach der Vierordtschen Methode und Versuchsergebnisse.

Die Versuchsanordnung entsprach derjenigen, die in § 7 für dieselbe Untersuchung aber mit helladaptiertem Auge geschildert wurde.

Auf das vom Auerbrenner vor dem Kollimatorrohr I stammende Spektrum wurde und zwar auf die obere Hälfte des ins Okularrohr gebrachten Spektralbezirkes weisses Licht geworfen, das vom Auerbrenner vor dem Kollimatorrohr III stammte und von dem zur Hälfte verdeckten Spiegel des Apparates auf den oberen Teil der rechten Gesichtsfeldhälfte im Okularrohr reflektiert wurde.

Doch musste hier, da die Helligkeitsverteilung des tief dunkel adaptierten Auges im Spektrum geprüft werden sollte, das entworfene Spektrum, wie das zugemischte Weiss stark abgeschwächt werden. Die gleichmässige Abschwächung des vom Auerbrenner vor dem Kollimatorrohr I stammenden Spektrums wurde in der § 9 geschilderten Weise erzielt, indem nicht der Auerbrenner selbst, sondern sein, durch eine Magnesiumoxydtafel reflektiertes Licht zur Entwerfung des Spektrums benutzt wurde.

Das zugemischte Weiss wurde dadurch abgeschwächt, dass zwischen Auerbrenner und Spalt l_3 eine Kombination mehrerer Rauchgläser eingeschaltet wurde, sodass das ins Okularrohr reflektierte, weisse Licht nur bei tiefster Dunkeladaptation des Auges wahrgenommen werden konnte.

Wie in § 7 wurde auch hier der Helligkeitswert von Licht einer bestimmten Wellenlänge durch die zugemischte Weissmenge bestimmt, die einen ebenmerklichen Sättigungsunterschied hervorrief zwischen der

nur mit dem Licht von dieser bestimmten Wellenlänge erleuchteten unteren und der, von diesem Licht und dem reflektierten Weiss zugleich betroffenen oberen, rechten Gesichtsfeldhälfte des Okularrohrs.

Es wurde der Helligkeitswert von Licht von 500 $\mu\mu$ Wellenlänge gleich 1 gesetzt und dann aus den in Spaltbreitenwerten von l_3 angegebenen, zugemischten Weissmengen in der in § 7 angegebenen Weise der relative Helligkeitswert der verschiedenen Spektrallichter berechnet.

Es wurden nach dieser Methode 2 Versuche (Tabelle XIX und XX) angestellt. In dem einen (Tabelle XIX) wurden die Helligkeitswerte der Lichter von 600—480 $\mu\mu$ Wellenlänge in Abständen von 20 $\mu\mu$ bestimmt, in dem zweiten (Tabelle XX) nur die der Lichter von 540, 520 u. 500 $\mu\mu$ Wellenlänge.

In Versuch II war im Vergleich zu Versuch I nur die Entfernung des Auerbrenners von der Magnesiumtafel geändert.

In den beiden folgenden Tabellen enthält Kolumne 1 die verschiedenen Wellenlängen, Kolumne 2 enthält die zugemischten Weissmengen in Spaltbreitenwerten angegeben, Kolumne 3 die relativen Helligkeitswerte bezogen auf den Helligkeitswert 1 von Licht von 500 $\mu\mu$ Wellenlänge.

Die Zahlenwerte in Kolumne 2 sind der Durchschnitt von den in je dreissig Einstellungen gewonnenen Zahlenwerten.

Tabelle XIX.

Versuch I.

λ $\mu\mu$	zugemischte Weissmengen in Spaltbreiten	relative Helligkeitswerte
600 „	19,7	0.35
580 „	43,7	0.78
560 „	62.4	1.11
540 „	70.4	1.25
520 „	85.4	1.51
500 „	56,4	1.—
480 „	35.8	0.63

Tabelle XX.

Versuch II.

λ $\mu\mu$	zugemischte Weissmengen in Spaltbreiten	relative Helligkeitswerte
540 „	38.0	1.09
520 „	40.0	1.14
500 „	35.0	1.—

§ 12.

Betrachtuug der in § 11 erhaltenen Resultate.

In der folgenden Tabelle XXI sind die im vorigen Paragraphen 11 erhaltenen Resultate zusammengestellt. Kolumne 1 enthält die verschiedenen Wellenlängen. Kolumne 2 die in Versuch I, Kolumne 3 die in Versuch II des vorigen Paragraphen gefundenen Helligkeitswerte. Die eingeklammerten Werte sind einfach aus Kolumne 2 nach Kolumne 3 hinübergenommen, da in Versuch II direkte Beobachtungen an diesen Punkten fehlten. Kolumne 4 enthält die aus Kolumne 2 und 3 gewonnenen Durchschnittswerte resp. eigentlichen, Helligkeitswerte der verschiedenen Spektrallichter für mein tief dunkeladaptiertes Auge. In der letzten Kolumne sind diese eigentlichen relativen Helligkeitswerte mit $\frac{11,1}{1,33}$ multipliziert. Diese letzteren sind der in der anhängenden Tafel unter III bezeichneten Kurve zu Grunde gelegt, die die Art der Helligkeitsverteilung meines Auges im Dispersionsspektrum sehr niederer Intensität darstellt, gefunden nach der Vierordtschen Methode.

Tabelle XXI.

λ $\mu\mu$	in § 11 gefundene relat. Helligkeitswerte		Durchschnittliche Helligkeitswerte	mit $\frac{11,1}{1,33}$ multip. Helligkeitswerte.
	Versuch I	Versuch II		
600 „	0.35	(0.35)	0.35	2.9
580 „	0.78	(0.78)	0.78	6.5
560 „	1.11	(1.11)	1.11	9.3
540 „	1.25	1.09	1.17	9.8
520 „	1.51	1.14	1.33	11.1
500 „	1.—	1.—	1.—	8.3
480 „	0.63	(0.63)	0.63	5.3

Betrachtet man die nicht eingeklammerten Werte der Kolumne 2 und 3 miteinander, so sieht man, dass die Beobachtungen nicht besonders gut übereinstimmen, was ja wohl an der Schwierigkeit derartiger Beobachtungen mit dunkeladaptiertem Auge liegt, wo eben mit peripheren Netzhautteilen und nicht mit der Stelle des schärfsten Sehens beobachtet wird. Jedoch ist es wahrscheinlich, dass der Durchschnittswert der in den beiden Versuchen gefundenen Werte der Wirklichkeit sehr nahe kommt

In beiden Versuchen wurde übrigens das Maximum der Helligkeit nach Licht von 520 $\mu\mu$ Wellenlänge verlegt.

Betrachtet man die Kurve III, so fällt in ihrem Verlauf bei λ 540 $\mu\mu$ ein Knick auf, während die Kurve im übrigen mit Kurve IV in ihrem Verlauf hinreichend gut übereinstimmt. Nach Abschluss der Versuche fand ich den Grund des Knicks in dem Umstand, dass in Versuch II des vorigen Paragraphen nur die drei Punkte $\lambda\lambda$ 540, 520 und 500 $\mu\mu$ beobachtet wurden. Da nun die Helligkeitswerte bei λ 540 und 520 $\mu\mu$ in Versuch II ziemlich bedeutend niedriger

gefunden wurden, als in Versuch I, so wurde ihr Durchschnittshelligkeitswert verhältnismässig niedrig, im Vergleich zu dem nur einmal bestimmten, in Versuch I verhältnissmässig hoch gefundenen Helligkeitswert von Licht von 560 $\mu\,\mu$ Wellenlänge.

Wäre auch dieser Punkt in Versuch II beobachtet worden, so wäre sein Helligkeitswert wahrscheinlich ebenfalls kleiner, als in Versuch I gefunden, d. h. sein Durchschnittshelligkeitswert kleiner als 1,11 (resp. 9,3) geworden, und der Knick in der Kurve hätte dann vermieden werden können. Da ich dies jedoch erst nach Abschluss der Untersuchungen merkte, konnte ich leider nicht noch einmal nach dieser Methode die Helligkeitswerte für die vier Punkte $\lambda\,\lambda$ 560, 540, 520 und 500 $\mu\,\mu$ bestimmen, um eine glatte Kurve zu erhalten.

Trotz des Knicks sieht man jedoch, dass die Kurven III u. IV in ihrem Verlauf ziemlich gut übereinstimmen und typisch, in der, von den verschiedenen Autoren beschriebenen Weise, von dem Verlauf der Kurven I und II abweichen. Ich möchte mich daher für Brauchbarkeit der VierordtschenMethode zurBestimmung derHelligkeitswerte der verschiedenen Lichter eines Spektrums auch sehr niedriger Helligkeit erklären.

Dass die beiden Kurven III u. IV nicht besser zusammen fallen, liegt an der erwähnten Ungenauigkeit der Einstellungen, die nicht durch die Methode an und für sich gegeben ist, sondern dadurch bedingt ist, dass man wegen der niedrigen Intensitäten mit peripheren Netzhautteilen diese Beobachtungen machen muss, und die Intensitäten der den Kurven entsprechenden Spektren verschieden waren.

§ 13.

Zusammenfassung der Resultate.

In der folgenden Tabelle XXII sind die nach den beiden Methoden für Hell- und tiefe Dunkeladaption des rotblinden Auges gefundenen Resultate mit den Zahlenwerten zusammen gestellt, wie sie den Kurven der Tafel zu Grunde gelegt sind. Kolumne 1 enthält die Wellenlängen, Kolumne 2, die der Kurve II zu Grunde gelegten, relativen Helligkeitswerte, Kolumne 3 die der Kurve I, Kolumne 4 die der Kurv IV. Kolumne 5 die der Kurve III zu Grunde gelegten, relativen Helligkeitswerte der Spektrallichter der entsprechenden Wellenlängen.

Tabelle XXII.

$\lambda\,\mu\mu$	Der Kurve II zu Grunde gelegte Helligkeitswerte	Der Kurve I zu Grunde gelegte Helligkeitswerte	Der Kurve IV zu Grunde gelegte Helligkeitswerte	Der Kurve III zu Grunde gelegte Helligkeitswerte
620 „	2.4	5.2		
600 „	6.6	8.0		
580 „	10.0	10.5	4.7	6.5
560 „	11.1	11.1	8.2	9.3
540 „	9.8	10.6	10.5	9.8
520 „	6 0	7.9	11.1	11.1
500 „	2.6	5.4	9.5	8.3
480 „	1.0	2.5	7.7	5.3

Stimmen auch je zwei sich entsprechende Kurven nicht so gut überein, dass sie — diejenigen für Helladaptation des Auges einerseits, für dunkeladaptiertes Auge andrerseits — sich vollkommen decken, so zeigen sie doch immerhin nur verhältnismässig unwesentliche Unterschiede. Dagegen tritt im Verlauf der Kurve I und II ein typischer Unterschied auf im Vergleich zu den beiden Kurven III und IV; d. h. Kurve III weicht in ihrem Verlauf in ähnlicher, typischer Weise von Kurve I ab, wie Kurve IV von Kurve II.

In den Kurven I und III kommt eben so, wie in den Kurven II und IV die von den Autoren angegebene, typische Verschiedenheit der Helligkeitsverteilung des Stäbchenapparates einerseits, des dichromatischen Zapfenapparates andrerseits im Spektrum zum Ausdruck.

Die verhältnismässig viel geringere Empfindlichkeit des tief dunkel adaptierten Auges resp. des Stäbchenapparates in der langwelligen Spektralhälfte, die verhältnismässig hohe Empfindlichkeit desselben in der kurzwelligen Spektralhälfte, ferner die Verschiebung des Helligkeitsmaximums nach dem Grünen zeigt die Kurve III im Gegensatz zu der Kurve I, die die Helligkeitsverteilung des helladaptierten Auges resp. vorwiegend des Zapfenapparates darstellt, ebenso gut, wie es Kurve IV im Gegensatz zu Kurve II thut.

Es ist demnach die Annahme gerechtfertigt, dass die Vierordtsche Methode für derartige Untersuchungen völlig brauchbare Resultate liefert, wenn auch wie schon hervorgehoben, die nach der Methode der heterochromen Photometrie gefundene Kurve II der Wirklichkeit wahrscheinlich näher kommt, als die nach der Vierordtschen Methode gefundene Kurve I.

Der Trichromat, dem es schwer fällt oder gar unmöglich ist, verschieden farbige Felder auf ihre Helligkeit hin miteinander zu vergleichen, wird daher zu Helligkeitsmesssungen der verschiedenen Spektrallichter, um brauchbare Resultate zu erhalten, die Vierordtsche Methode anwenden können.

Der Dichromat jedoch wird wohl entschieden der der heterochromen Photometrie den Vorzug geben, da die Schwierigkeit dieser Methode für ihn auf einen verhältnismässig kleinen Spektralteil beschränkt ist, während sie für den übrigen Teil fortfällt, wo die Helligkeitsvergleichung ihm gleichfarbig erscheinender Felder jedenfalls genauer ausfällt, als die Wahrnehmung des ebenmerklichen Sättigungsunterschiedes durch Zumischung weissen Lichtes. Bei tief dunkeladaptiertem Auge, dem ein äusserst lichtschwaches Spektrum in seiner ganzen Ausdehnung farblos erscheint, fallen diese Gründe allerdings fort, und da dürfte die Vierordtsche Methode auch dem Dichromaten dasselbe leisten, wie die der heterochromen Photometrie.

So stimmen auch in der Tafel die Kurven III u. IV etwas besser miteinander überein als die Kurven I u. II, trotzdem bei Bestimmung der Kurven III u. IV die Schwierigkeit bestand, dass mit excentrischen

Netzhautstellen beobachtet wurde und die Intensitätsunterschiede der untersuchten Spektren eine geringe Abweichung ihres Verlaufes hinreichend erklären.

In einigen flüchtigen Versuchen untersuchte ich noch die Helligkeitsverteilung, die mein Auge im Spektrum niederer Intensität vornimmt, dessen Intensität aber immerhin gross genug war, um schon nach geringer Dunkeladaptation wahrgenommen zu werden und Farbenempfindungen auszulösen. Die aus diesen Resultaten gewonnenen Kurven, die in der Tafel nicht dargestellt sind, zeigten Uebergangsformen zu den beiden auf der Tafel dargestellten Kurvenpaaren. Diese Uebergangskurven sind weiter nichts, wie der Ausdruck dessen, was man früher unter dem Purkinjeschen Phänomen beschrieben hat, d. h. dass bei verschiedenen Beleuchtungsgraden die verschiedenen Farben verschiedene Helligkeitsempfindung auslösen, z. B. ein bestimmtes Rot, das am Tage heller aussieht als ein bestimmtes Blau, in der Dämmerung dunkler erscheint, als dieses.

Diese Uebergangsformen nähern sich, je heller, innerhalb gewisser, niederer Intensitäten das Spektrum ist, den auf der Tafel als Kurve I und II bezeichneten, je dunkler es ist, den Kurven III u. IV.

Je stärker innerhalb gewisser, niedriger Intensitäten des Spektrums der Zapfenapparat in Funktion tritt, resp. je heller innerhalb gewisser niedriger Intensitätsgrade das Spektrum ist, desto mehr nähert sich die Kurve der Helligkeitsverteilung derjenigen bei vollständig helladaptiertem Auge d. h. den Kurven I und II der Tafel.

Je geringer die Intensität des Spektrums, je mehr die Funktion des Zapfenapparates hinter die des Stäbchenapparates zurücktritt, desto mehr nähert sich dann die Kurve der Helligkeitsverteilung in ihrer Form den Kurven III und IV der Tafel.

Zum Schluss möchte ich noch bemerken, dass sowohl die Kurve I, als die Kurve II der Tafel die von den verschiedenen Autoren beschriebenen Charakteristika des Rotblinden, Protanopen, zeigt im Gegensatz zum Grünblinden, dem Deuteranopen im v. Kries'schen Sinne, nämlich:

1. Die äusserst geringe Empfindlichkeit meines Auges im langwelligen Teil des Spektrums, die noch deutlicher war, als ich den Verlauf der Kurve II noch weiter nach dem Rot hin ergänzte.

2. Die nach dem Grünen zu verschobene Lage des Helligkeitsmaximums, welche bei den Trichromaten und Grünblinden in der Gegend der Natriumlinie liegt.

3. Die grössere Empfindlichkeit meines Auges im Grünen, im Gegensatz zum Grünblinden.

Diese drei Punkte traten besonders deutlich hervor, als ich die Kurve eines anderen Dichromaten, Herrn caud. med. S. zeichnete, dessen Helligkeitsverteilung im gleichen Spektrum bei helladaptiertem Auge

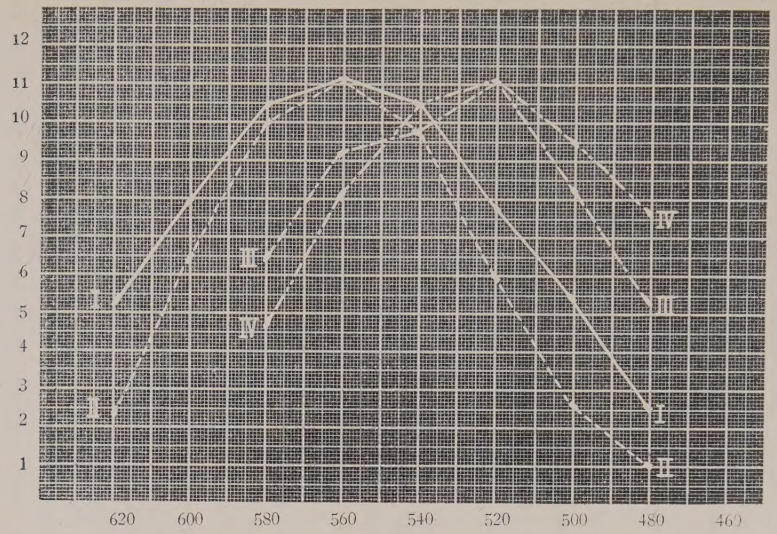
ich nach der Methode der heterochromen Photometrie untersuchte, und die alle Charakteristika des deuteranopischen Farbensystems zeigte.

Ausserdem möchte ich hier noch bemerken, dass auch die Lage des neutralen Punktes bei mir in typischer Weise blauwärts lag, im Vergleich zur Lage desselben bei Herrn S. Während nämlich mein neutraler Punkt im Auerbrennerspektrum um λ 500 $\mu\mu$ liegt, liegt er bei diesem um λ 512 $\mu\mu$ herum.

Die Untersuchungen sind im Wintersemester 1900/01 im Berliner Physiologischen Institut und zwar in der Abteilung für Physiologie der Sinnesorgan angestellt worden.

Für Anregung und Beratung bei denselben bin ich dem leider indessen verstorbenen Professor A. König zu grossem Dank verpflichtet.

Tafel



Kurve I. Vierordtsche Methode (helladaptiertes Auge).
Kurve II. Methode der heterochromen Photometrie (helladaptiertes Auge).
Kurve III. Vierordtsche Methode (dunkel adaptiertes Auge)
Kurve IV. Methode der heterochromen Photometrie (dunkel adaptiertes Auge)

Lebenslauf.

Ich, Sigmar Karplus, jüdischer Abstammung, wurde am 13. Dezember 1878 zu Borek in Posen, als Sohn des damaligen Volksschullehrers, jetzigen Bankbeamten Berthold Karplus und seiner Ehefrau, Henriette geb. Neustadt geboren.

Meine Vorbildung erhielt ich am Köllnischen Gymnasium zu Berlin, das ich Michaelis 1897 mit dem Zeugnis der Reife verliess, um Heilkunde zu studieren. Acht Semester studierte ich in Berlin, wo ich im Juli 1899 die ärztliche Vorprüfung bestand. Im neunten Semester, Michaelis 1901, ging ich an die Universität Breslau. Daselbst unterzog ich mich am 4. April 1902 der ärztlichen Staatsprüfung, die ich am 15. Juli desselben Jahres mit Erfolg beendete, auf Grund dessen ich am 29. Juli 1902 als Arzt approbiert wurde.

Seit meiner Approbation vertrat ich mehrere praktische Aerzte. Augenblicklich bin ich Assistenzarzt an einer Berliner Unfallstation.

Während meiner Studienzeit besuchte ich die Vorlesungen, Kliniken und Kurse folgender Herren Professoren und Dozenten.

B. Baginsky, Czerny, Engelmann, Filehne, Flügge, Fritsch, Gerhardt,(†) Greeff, Gusserow, Heine, Henke, Hertwig, Jolly, F. König, Kopsch, W. Krause, Krienes, Küstner, Langerhans, v. Michel, v. Mikulicz H. Munk, J. Munk, Nagel, Ponfick, Rosin, Rubner, Schmidt, Schweninger, Senator, Sticher, Thiemich, Uhthoff, R. Virchow(†), Waldeyer, Wernicke, Zinn.

Allen diesen, meinen hochverehrten Lehrern, spreche ich meinen Dank aus.

Thesen:

I.

Rotblindheit und Grünblindheit sind verschiedene Arten des dichromatischen Farbensystems.

II.

Im Interesse eines gründlichen und wissenschaftlichen medizinischen Studienganges müssten die Honorarien, fürLaboratoriumsarbeiten wenigstens, erheblich ermässigt werden.

III.

Nach Einführung des praktischen Jahres sollte der medizinische Doktortitel nicht nach Ablegung des Staatsexamens, wie in den Bestimmungen vorgesehen ist, sondern erst nach Absolvierung des praktischen Jahres verliehen werden.